

Wärme-Kraft-Kopplung (WKK)

Basiswissen-Dokument, Stand Januar 2018

1. Zusammenfassung

Knapp ein Drittel des Endenergieverbrauchs wird heute für die Erzeugung von Wärme eingesetzt, ein Grossteil davon durch die direkte Verbrennung von Heizöl und Erdgas in Heizkesseln. In Anbetracht des Umwelt- und insbesondere des Klimaschutzes, der Kostenunsicherheit und der Auslandsabhängigkeit ist dies langfristig nicht sinnvoll. Auch wenn Effizienzmassnahmen wie verbesserte Wärmedämmung bei Gebäuden umgesetzt werden, wird immer noch ein erheblicher Wärmebedarf bestehen bleiben, bis 2050 je nach Energiepolitik 50 % bis 70 % des heutigen Wertes. Ein nicht unwesentlicher Teil davon wird mit fossilen Brennstoffen gedeckt werden müssen. Sofern ein grosser und möglichst konstanter Wärmebedarf besteht und relativ hohe Temperaturen erforderlich sind, könnten hier Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen zum Einsatz kommen.

Die Stromproduktion von WKK-Anlagen könnte unter bestimmten Rahmenbedingungen laut einem Szenario des Bundesamtes für Energie (BFE) bis zu 11,5 TWh erreichen. WKK ist nicht unbedingt die wirtschaftlichste Lösung; sie ist aber energetisch effizienter als eine voneinander getrennte und auf fossilen Brennstoffen basierte Wärme- und Stromproduktion. Wenn dezentrale WKK-Anlagen langfristig eine wichtige Rolle in der Energieversorgung spielen sollen, müssen die richtigen Rahmenbedingungen geschaffen werden, um die heutigen technischen und wirtschaftlichen Hürden zu überwinden. Für einen WKK-Ausbau sind Fördermassnahmen notwendig.

2. Heutige Situation in der Schweiz

2.1 Vorausgehende Bemerkung

Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK-Anlagen) sind Systeme, die gleichzeitig Strom und Wärme produzieren. Der Strom wird mit einem Motor oder einer Brennstoffzelle erzeugt, die dabei entstehende Abwärme wird gleichzeitig für Heizzwecke (Komfortwärme) oder Produktionsprozesse (Prozesswärme) genutzt. Im Vergleich zu einer voneinander komplett getrennten Bereitstellung von Wärme und Strom mit fossilen Brennstoffen erreichen WKK-Anlagen höhere Gesamtwirkungsgrade und damit einen geringeren CO₂-Ausstoss. Voraussetzung hierfür ist jedoch die vollständige Nutzung der entstehenden Produkte Wärme und Strom. Während der Strom dabei ins allgemeine Versorgungsnetz eingespeist wird, muss die Wärme lokale Verwendung finden. Anders als bei rein auf die Stromproduktion ausgelegten thermischen Kraftwerken ist deshalb in der Regel der Wärmebedarf massgebend für die Fahrweise einer WKK-Anlage.

Bei der Beurteilung künftiger Strategien der fossilen Stromproduktion ist deshalb immer auch die Bereitstellung der Wärme miteinzubeziehen. Als Alternative zu einer WKK-Strategie ist insbesondere eine Kombination von Gas- und Dampf-Kombikraftwerk (GuD) mit Wärmepumpe (WP) zu betrachten. Mit GuD-Anlagen wird Strom mit möglichst hohem elektrischem Wirkungsgrad produziert und damit Wärmepumpen zur Bereitstellung von Komfortwärme betrieben.

Im vorliegenden Dokument werden fossil betriebene WKK-Anlagen behandelt. Mit Biomasse betriebene WKK-Anlagen werden im Basiswissen-Dokument „Strom aus Biomasse“ vorgestellt. Von den Anlagen, die auf Wasserstoff basieren, werden nur Brennstoffzellen betrachtet. Diese wandeln fossile Brennstoffe in Wasserstoff, der damit zu einem Energieträger wird.

2.2 Die Wärme-Kraft-Kopplung in der Schweiz

Als WKK-Anlagen werden in der Schweiz thermische Stromerzeuger bezeichnet, die aus fossilen oder biogenen Energieträgern in einem gekoppelten Prozess gleichzeitig Strom und Wärme produzieren. Dabei gelten folgende Bedingungen: Mindestens 5 % der eingesetzten Energie müssen in Elektrizität umgewandelt werden und der Gesamtnutzungsgrad (Wärme und Elektrizität) muss mindestens 60 % betragen¹. Um vergleichbare Technologien und Einsatzbereiche zusammenfassen zu können, wird zwischen Klein- und Gross-WKK-Anlagen unterschieden.

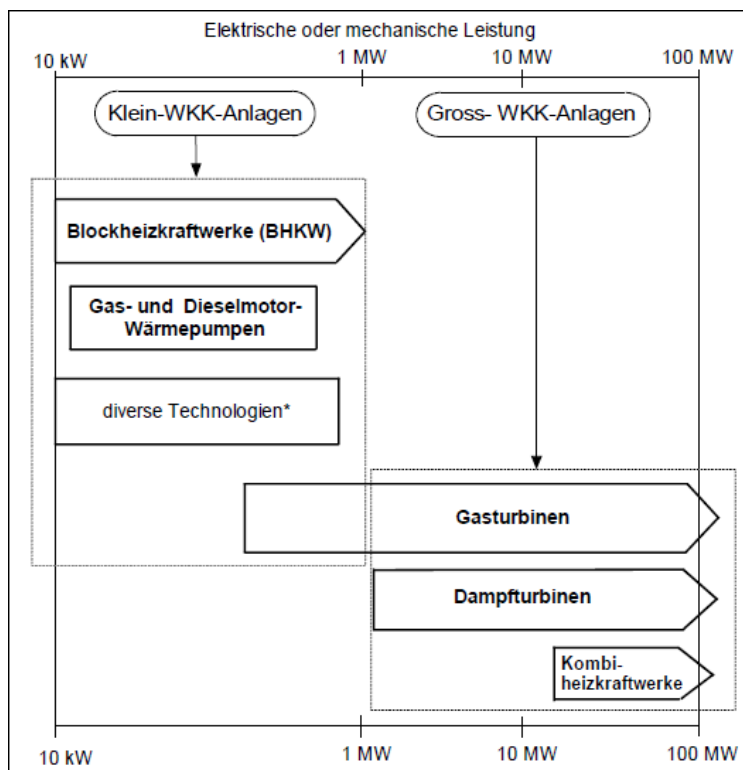


Abbildung 1: Aufteilung der Wärme-Kraft-Kopplungstechnologien und Leistungsbereiche in Klein- und Gross-WKK-Anlagen. Quelle: BFE 2011.

In der Schweiz sind über 1000 WKK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von knapp 600 MW in Betrieb (mit erneuerbaren oder nicht erneuerbaren Brennstoffen). Die Anlagen produzieren ca. 1660 GWh Strom, was etwa 2,5 % der gesamten Elektrizitätserzeugung entspricht. Über 40 % der WKK-Stromproduktion stammt aus erneuerbaren Quellen.

¹ Quelle: BFE 2016

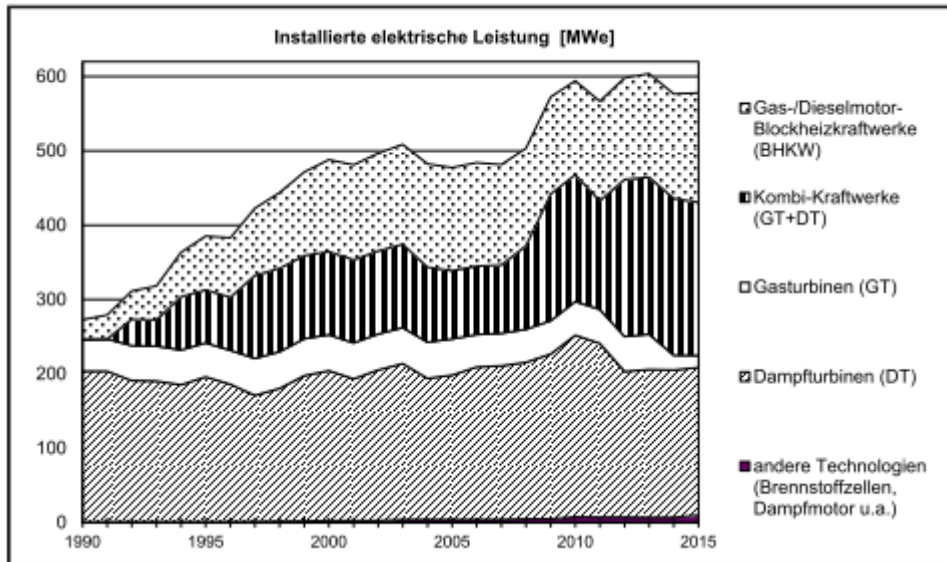


Abbildung 2: Entwicklung der elektrischen Leistung der WKK-Anlagen, unterschieden nach Technologien. Quelle: BFE 2016.

WKK-Anlagen sind verschiedenen gesetzlichen Grundlagen unterstellt: Bundesverfassung, Energiegesetz, Energieverordnung sowie der Verordnung über die CO₂-Abgabe. Komplexe Rahmenbedingungen sind in der Schweiz auch durch die strenge und unterschiedliche nationale, kantonale und kommunale Gesetzgebung vorhanden. Hingegen besteht generell kein Akzeptanzproblem für WKK-Anlagen in der Bevölkerung.

2.3 Hemmnisanalyse des BFE

WKK-Anwendungen konnten sich bisher in der Schweiz nicht auf breiter Front durchsetzen. Die Gründe hierfür wurden in einer Studie des BFE untersucht.² Dabei stand die Frage im Zentrum, welche Hemmnisse dem Einsatz der verschiedenen WKK-Technologien in einzelnen Anwendungsbereichen in der Schweiz entgegenstünden.

Das BFE hat Hemmnisse auf verschiedenen Ebenen eruiert:

- Juristisch: mehrere Gesetze, insbesondere CO₂-Gesetze, und Vorschriften auf den Ebenen Bund, Kanton und Gemeinde
- Technisch: Anlagen bei Einzelwohngebäuden mit vergleichsweise neuen Technologien; Image der Technik
- Ökonomisch: Energiepreise von Heizöl, Erdgas und Elektrizität; Rückliefertarife Elektrizität; Betreiberkompetenz bei Kleinanlagen; Kosten Wärmeverteilung bei Grossanlagen
- Politisch: Akzeptanz bei energiepolitischen Akteuren (Grossanlagen); Energiepolitisches Programm Bund; Bekanntheit und Akzeptanz bei Anwohnern bei Grossanlagen

² Quelle: BFE 2009

Als Gesamtergebnis führte die Analyse zur Erkenntnis, dass die Hemmnisse so zahlreich und vielfältig sind, so dass sich keine Anwendung erkennen lässt, die sich in den nächsten Jahren am Markt selbständig durchsetzen könnte.

Eine weitere Entwicklung der Technologie bleibt dennoch wahrscheinlich. Denn das technische Potenzial ist gross und die Gestehungskosten der produzierten Elektrizität sind tiefer als bei erneuerbaren Energien. Zudem bieten WKK-Anlagen eine hohe Gesamtenergieeffizienz. Der Einsatz von WKK-Anlagen könnte sinnvoll sein, wenn hohe Vorlauftemperaturen benötigt werden, beispielsweise für Wärme in industriellen Prozessen oder für Komfortwärme in Gebäuden, die energetisch nicht zu sanieren sind, oder wenn sie einen Heizkessel ersetzen, der Erdgas oder Heizöl direkt verbrennt. Solange keine günstigen und erprobten Brennstoffzellen auf dem Markt sind, werden sich aber voraussichtlich vor allem Gross-WKK-Anlagen weiterentwickeln.

3. Stand und weitere Entwicklung der Technik

Die meisten WKK-Anlagen sind Blockheizkraftwerke (BHKW). Sie bestehen aus einem Verbrennungsmotor und einem Generator. Der Motor erzeugt mechanische Energie und treibt damit den Generator zur Stromproduktion an. Die Abwärme, die sich nutzen lässt, stammt aus der Motorenkühlung und dem Abgas. WKK-Anlagen können in der Industrie eingesetzt werden und versorgen dort die Betriebe mit Strom und Prozesswärme. Eine andere Anwendung ist der Wohnbereich. Dort liefern die Anlagen Wärme (Fern- und Nahwärme) für ganze Wohngebiete oder Mehrfamilienhäuser mit einer Mindestgrösse von etwa zehn Wohnungen, oder auch für Einfamilienhäuser.

Zurzeit sind die grössten WKK-Anlagen in der Schweiz Kehrlichtverbrennungsanlagen und Industrieanlagen, bei denen Dampf durch die Verbrennung eines Brennstoffes erzeugt wird und eine Dampfturbine antreibt (sog. Gaskombikraftwerke mit Wärmeauskopplung, siehe auch das Basiswissen-Dokument „Gas- und Dampf-Kombianlagen (GuD)“). Als Antrieb für den Stromerzeuger können Verbrennungsmotoren, das heisst Diesel- oder Gasmotoren, aber auch Gasturbinen oder Stirlingmotoren eingesetzt werden. Stirlingmotoren und Brennstoffzellen gehören möglicherweise zu den künftigen Technologien.

Der **Stirlingmotor** ist eine Wärme-Kraft-Maschine mit zwei Zylindern, in der ein abgeschlossenes Arbeitsgas von aussen an zwei verschiedenen Bereichen abwechselnd erhitzt und gekühlt wird. Dadurch bewegen sich die Kolben und es wird mechanische Arbeit geleistet. Er arbeitet nach dem Prinzip eines geschlossenen Kreisprozesses und ist ein Beispiel für die Energieumwandlung von einer schlecht nutzbaren Energieform (thermische Energie) in die besser einsetzbare Energieform mechanischer Energie.

Auch **Brennstoffzellen** ermöglichen die Wärme-Kraft-Kopplung. Eine Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle, welche die chemische Reaktionsenergie eines Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie wandelt. Als Brennstoff wird im allgemeinen Wasserstoff genutzt, der aus Naturgas, Biogas, Ameisensäure oder Alkohol gewonnen wird; als Oxidationsmittel wird Sauerstoff eingesetzt. Mittelfristig ist einzig bei der Brennstoffzelle eine Entwicklung zu erwarten. Der Aufschwung von Brennstoffzellen kleiner Leistung für Ein- und Zweifamilienhäuser ist zwar seit langer Zeit angekündigt, eine Massenproduktion ist jedoch noch nicht in Sicht. Weitere Entwicklungen könnten im Bereich neuer Brennstoffe erfolgen.

4. Potenzial

Das Szenario „Neue Energiepolitik“ des BFE vom Mai 2011³ geht unter Annahme bestimmter einschränkender Rahmenbedingungen davon aus, dass der Raum- und Prozesswärmebedarf in den nächsten Jahrzehnten in Folge von Effizienzsteigerungen und besserer Wärmedämmung zurückgehen wird, und zwar um ungefähr 31 % bis 2035 und um 43 % bis 2050. Fossile Energieträger werden 2035 137 PJ und 2050 108 PJ beitragen. Würden nur WKK-Anlagen eingesetzt, könnten theoretisch im Jahr 2035 etwa 13,5 TWh Strom erzeugt werden, im Jahr 2050 15 TWh (Annahmen 2035: η_{el} WKK = 0,45, JAZ WP = 4,0; Annahmen 2050: η_{el} WKK = 0,6, JAZ WP = 5,0). In den Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates (Frühjahr 2011) werden 13,45 TWh_{el} im Jahr 2050 in Betracht gezogen. Das entspricht beinahe dem theoretischen bzw. technisch realisierbaren Wert⁴.

Der sinkende Energiebedarf von Gebäuden aufgrund verbesserter Gebäudeisolierungen wird künftig den Einsatz von WKK-Anlagen begrenzen, denn der Wirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit der Anlagen sinken mit abnehmender Leistung. Bei einem massiven Ausbau müssten bestehende Gebäude und Heizanlagen umgebaut und in Einzelfällen Erdgasnetze erweitert werden. Obwohl technische Fortschritte in den nächsten 40 Jahren den Wirkungsgrad der WKK-Anlagen und die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen erhöhen werden, ist davon auszugehen, dass ohne Förderung kaum 40 % des theoretischen Potenzials umgesetzt werden kann.

5. Einschätzung zu Leistungsverfügbarkeit und Energiequalität

WKK-Anlagen können theoretisch auf zwei Arten betrieben werden. Im wärmegeführten Betrieb ist der Wärmebedarf ausschlaggebend für die Produktion und der erzeugte Strom wird als Nebenprodukt in das Elektrizitätsnetz gespeist. So wird alle Nutzenergie verwendet. Die zweite Betriebsart ist stromgeführt, das heisst die Produktion richtet sich nach dem Strombedarf. Weil aber die Wärme im Gegensatz zum Strom nur lokal verwendet werden kann, muss zu viel produzierte Wärme gespeichert werden, wenn alle Nutzenergie Verwendung finden soll. Im stromgeführten Betrieb muss die Anlage also über einen Wärmespeicher oder eine zusätzliche Heizquelle verfügen, um die überschüssige Wärme zu nutzen oder fehlende Wärme zu decken. Aber auch wenn ein Speicher genügender Grösse vorhanden ist, verringern die Wärmeverluste den Gesamtwirkungsgrad.

Um hohe Gesamtwirkungsgrade von bis zu 90 % zu erreichen, muss eine WKK-Anlage daher in der Regel wärmegeführt betrieben werden. Dabei sind die Stromgestehungskosten jedoch höher als beim stromgeführten Betrieb, da die Investitionen in die Anlage auf eine kleinere Menge Strom verteilt werden müssen.

Die Betriebsstunden von heizwärmegeführten Anlagen liegen typischerweise zwischen 3000 und 4500 pro Jahr⁵. Zwar erreichen gewisse Anlagen höhere Betriebsvolllaststunden (5000 Stunden pro Jahr und mehr). Dies sind allerdings Einzelfälle, zum Beispiel bei Spitälern oder Altersheimen, wo ein besonders hoher Wär-

³ Quelle: BFE 2011

⁴ In seiner Publikation „Wärme und Strom effizient kombinieren“ (Frühling 2011) erwähnt der Verband V3E ein Potenzial von 12 % im Jahr 2030, was 7 GWh entspricht. Quelle: V3E 2011

⁵ Quelle: Grruneko 2010

mebedarf besteht (Komfort und eventuell Prozesswärme). Anlagen in Wohnsiedlungen, in Dienstleistungsgebäuden und in der Industrie erreichen rund 4000 Betriebsvolllaststunden pro Jahr, wenn die WKK-Anlage den grössten Teil des Wärmebedarfs deckt.

Im täglichen Betrieb kann mit folgenden Energieanteilen gerechnet werden:⁶

Laufzeit Sommer	25 %
– davon Betrieb Tag (6h – 22h)	75 %
– davon Betrieb Nacht (22h – 6h)	25 %
Laufzeit Winter	75 %
– davon Betrieb Tag (6h – 22h)	60 %
– davon Betrieb Nacht (22h – 6h)	40 %

6. Gestehungskosten

Für neue Anlagen mit einer elektrischen Leistung über 200 kW liegen zurzeit die Investitionskosten um 900 Franken pro kW. Bei kleinere Anlagen mit einer Leistung von 110kW betragen die Investitionskosten rund 1400 Fr.⁷

Bis 2035 werden die Kosten voraussichtlich sinken, dank der Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades und der Steigerung der mittleren Leistung von Neuanlagen.

Bis 2050 werden mit grösster Wahrscheinlichkeit Brennstoffzellen zur Verfügung stehen, die mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 60 % arbeiten. Es ist anzunehmen, dass die Investitionskosten proportional zur Erhöhung des Wirkungsgrades sinken. Mit grösseren Leistungen sinken auch die Betriebs- und Unterhaltskosten (B&U-Kosten). Zudem gibt es in Brennstoffzellen keine Bewegung, dementsprechend werden keine mechanischen und lufttechnischen Abnutzungen vorhanden sein.

7. Rahmenbedingungen

Unter den heutigen Rahmenbedingungen werden sich fossil betriebene WKK-Anlagen nur in spezifischen Bereichen wie Spitälern, Industrien mit Dampfprozessen oder Nah- und Fernwärme-Heizzentralen entwickeln, wo eine kontinuierliche Wärmeabnahme gesichert ist. Die Tatsache, dass mehr als 10 000 Ölfeuerungen mit hohen thermischen Leistungen und über 20 Betriebsjahren ersetzt werden müssen, könnte aber eine Chance für den Ausbau der WKK sein. Bei der Verbrennung fossiler Energieträger sollte der Einsatz einer WKK-Anlage als Alternative deshalb immer geprüft werden. Ein wesentlicher Ausbau lässt sich vermutlich nur mit einer relativ starken Förderung (Gesetze oder Verordnungen, Rücklieferatarife, Ausnahmen von Abgaben, Vorbildfunktion beim Umbau öffentlicher Gebäude etc.) erreichen.

⁶ Quelle: BFE 2007

⁷ Quelle: WKK Fachverband

8. Bewertung und SWOT-Analyse

Bewertungskriterium	2017	2035	2050
Investitions- und Geste- hungskosten	Gestehungskosten über Marktpreis, abhängig vom Wärmeerlös. In der Regel günstiger als erneuerbare Energie.	Kosten im Bereich des erwarteten Marktpreises, abhängig von technischen Entwicklungen.	Kosten im Bereich des erwarteten Marktpreises. abhängig von technischen Entwicklungen.
Umweltverträglichkeit	höhere CO ₂ -Belastung als Schweizer Strommix	höhere CO ₂ -Belastung als Schweizer Strommix	höhere CO ₂ -Belastung als Schweizer Strommix
Verfügbarkeit der Energie	Grund- und Mittel- last-Erzeugung, be- sonders im Winter	Grund- und Mittel- last-Erzeugung, be- sonders im Winter	Grund- und Mittel- last-Erzeugung, be- sonders im Winter
Produktionspotenzial	ca. 1,1 TWh (1,9 % des Strombedarfs).	ca. 3,8 TWh	ca. 6 TWh
Gesellschaftliche Akzep- tanz	kein besonderes Problem	kein besonderes Problem	kein besonderes Problem
Politische Akzeptanz	kein besonderes Problem	kein besonderes Problem	kein besonderes Problem

Tabelle 1: Bewertung der Stromproduktion mit Wärme-Kraft-Kopplung nach verschiedenen Kriterien für die Zeiträume 2017, 2035 und 2050. Grün: gut, orange: genügend, rot: schlecht

extern	<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> - politischer Wille, Kernenergie nicht weiterzuführen - Ersatzbedarf zahlreicher (mehr als 10 000) Ölfeuerungen mit hohen thermischen Leistungen und über 20 Betriebsjahren - Gas umweltverträglicher als Öl (als Ersatz von Ölfeuerungen) - Entwicklung der Brennstoffzelle - hohe Gesamtenergieeffizienz - einfache Bewilligung nötig 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> - starke Erhöhung der CO₂-Abgabe - Lärmproblem - Abnahme des Wärmebedarfs durch verbesserte Wärmeisolierungen - Unsicherheit bezüglich Kosten bei Umbau von bestehenden Heizanlagen - Änderung CO₂-Gesetz, dadurch höhere CO₂-Kosten mit Auswirkungen auf Strom- und Wärmepreis
intern	<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> - ausgereifte Technologie, keine Überraschung - kann dank Contracting interessant für EVU sein - hohes Know-how bei EVU vorhanden - Industrien zahlen für den eigenen Stromverbrauch im Werkareal kein Netznutzungsentgelt 	<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> - geringe Regelfähigkeit falls wärmegeführt - Abhängigkeit vom Wärmebedarf - Gestehungskosten im Moment noch hoch - keine CO₂-freie Stromproduktion - Ausbau Gasnetz bzw. Vorrang von WKK und Verdichtung Gasanschlüsse nötig - starker Ausbau nur im Erneuerungsmarkt mit oft hohen Anpassungskosten möglich.

Tabelle 2: SWOT-Analyse

9. Die wichtigsten Zahlen im Überblick

Kennzahl	Jahr	Quelle	Wert
Anzahl WKK-Anlagen in der Schweiz	2015	BFE, Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2015, Kapitel 4.1	1011
Elektrische Leistung WKK-Anlagen in der Schweiz	2015	BFE, Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2015, Kapitel 4.1	578 MW
Jahresstromproduktion aus WKK-Anlagen in der Schweiz	2015	BFE, Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2015, Kapitel 4.1	1604 GWh
erneuerbare Anteil WKK-Stromproduktion in der Schweiz	2015	BFE, Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2015, Kapitel 4.2	42 %

10. Quellenverzeichnis

BFE 2007	Die Energieperspektiven 2035 – Band 5, Analyse und Bewertung des Elektrizitätsangebotes, Bundesamt für Energie BFE, Bern, Juni 2007
BFE 2009	Beseitigung von Hemmnissen bei der Verbreitung von Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2009
BFE 2011	Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates, Aktualisierung der Energieperspektiven 2035; Frühjahr 2011, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2011
BFE 2016	Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK), Ausgabe 2015, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2016
Eurelectric 2007	Statistics and prospects for the European electricity sector (Eurprog 2007), Eurelectric, Brüssel, 2007
Gruneko 2010	Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von BHKW-Anlagen, Gruneko Schweiz AG, Basel, 2010
WKK-Fachverband	Schweizerischer Fachverband für Wärmekraftkopplung, Oktober 2017
V3E 2011	Wärme und Strom effizient kombinieren, Verband effiziente Energieerzeugung, Sarnen, 2011